



Science Arts & Métiers (SAM)

is an open access repository that collects the work of Arts et Métiers Institute of Technology researchers and makes it freely available over the web where possible.

This is an author-deposited version published in: <https://sam.ensam.eu>
Handle ID: <http://hdl.handle.net/10985/9228>

To cite this version :

Laurent BARRALLIER - Chapitre 8.1 Applications en aéronautique - 2012

Any correspondence concerning this service should be sent to the repository

Administrator : scienceouverte@ensam.eu



Applications en aéronautique (L. Barrallier)

1- Progression dans l'utilisation des grands instruments

Depuis une vingtaine d'années, l'utilisation de grands instruments dans l'analyse de contraintes est en constante augmentation. À titre d'exemple, la Figure 1 montre cette évolution lors des conférences internationales ICRS (International Conference on Residual Stresses). Le domaine de l'aéronautique bénéficie de l'ouverture des grands instruments ce qui représente à environ 20% des articles. Durant la fin des années 1990, un nombre important de spectromètres de contrainte a été mis en place au niveau des grandes infrastructures (sources de neutrons et sources synchrotrons), une part importante des articles leur était alors consacrée. L'essentiel des contributions concerne les matériaux polyphasés (composites à matrice métalliques au début des années 1990), les procédés de fabrication (mise en forme, laminage,...), les traitements de surface (grenaillage de précontrainte, traitements thermochimiques,...) et d'assemblage (soudage en particulier depuis les années 2000). Ceci est directement relié à la nature même de l'aéronautique qui cherche une constante optimisation des procédés de fabrication et de la performance des pièces mécaniques par rapport à leur durabilité et leur masse. Les analyses classiques en laboratoire utilisant essentiellement la diffraction des rayons X peuvent alors avantageusement être complétées par des analyses sur grands instruments.

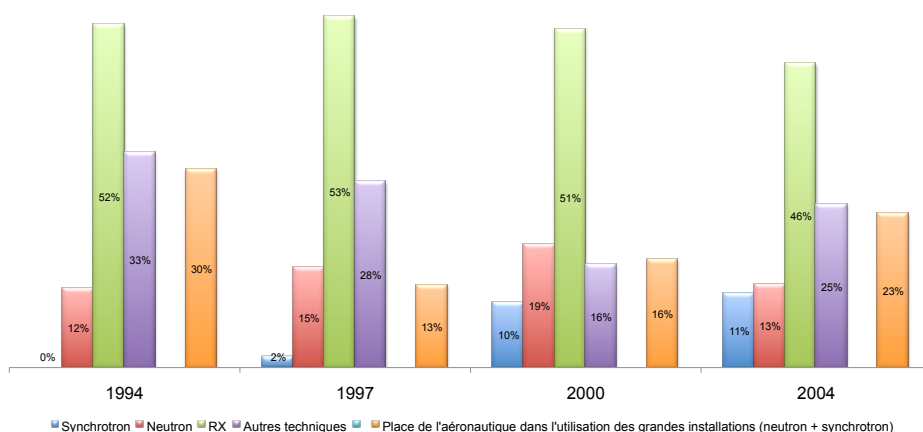


Figure 1 : Part des techniques diffractométriques et part du domaine aéronautique concernant l'analyse de contraintes sur grands instruments lors des conférences internationales ICRS.

En aéronautique, la détermination des contraintes résiduelles devient un enjeu primordial dans la réalisation des pièces vitales. En effet, les effets bénéfiques des contraintes résiduelles sur la durée de vie en fatigue des structures ou des pièces fortement sollicitées ne sont plus à démontrer. Tout comme dans l'automobile, la conception des pièces mécaniques passe par la prise en compte des contraintes résiduelles générées par les opérations d'usinage, les procédés de fabrication. Il n'est plus rare de voir au niveau des dessins de définition, des cotations de niveaux ou de profils de contraintes. Ceci entraîne la mise en place de procédures d'analyse

de contraintes qui sont essentiellement basées sur l'utilisation de la diffraction des rayons X classique grâce à la facilité relative de son utilisation et son aptitude à pouvoir déterminer des contraintes superficielles ou en proche surface avec un enlèvement de matière peu important. Cependant, ces contrôles ne peuvent être mis en place qu'après une phase d'optimisation. En aéronautique, cette phase d'optimisation est généralement longue et coûteuse. Elle a pour but de figer les paramètres technologiques du procédé ou du processus de fabrication de la pièce afin d'assurer un dimensionnement optimal de la pièce mécanique par rapport à une durée de vie fixée qui doit être garantie. L'utilisation de grands instruments (neutron ou synchrotron) a permis depuis maintenant presque deux décennies de profiter d'outils d'analyse remarquables adaptés à l'étude de procédés de fabrication ou de traitement de surface en venant compléter les analyses de contraintes classiques effectuées par diffraction des rayons X. Ceci permet d'approfondir les études par la mise en place d'analyse de contraintes loin des surfaces qui étaient auparavant impossible à faire. Ainsi il est possible de comparer les résultats des simulations numériques, utilisées pour prédire les champs de contraintes, à des mesures expérimentales dans tout le volume de la pièce (en surface et proche surface avec la diffraction des rayons X « classique » et loin des surfaces avec la diffraction des neutrons et l'utilisation du synchrotron). Ces techniques ne sont pas concurrentes mais bien complémentaires.

2- Analyse de contraintes et corrections instrumentales.

La particularité de la diffraction des neutrons ou du rayonnement synchrotron est d'avoir des volumes sondes réellement tridimensionnels et très souvent beaucoup plus importants que dans les techniques classiques utilisant les rayons X. Le rayonnement produit sur un synchrotron peut avoir des énergies comparables aux rayons X « classique » de quelques keV (4,5-8 keV) mais également être beaucoup plus énergétiques de quelques dizaines de keV à quelques centaines de keV (30-500 keV pour la ligne ID15A de l'ERSF). Dans tous les cas le flux de ce rayonnement est de plusieurs ordres de grandeurs supérieurs au flux de rayons X produit en laboratoire même avec l'aide de générateur de forte puissance telle que les anodes tournantes. Pour l'analyse de contrainte il est alors intéressant d'utiliser le rayonnement produit sur synchrotron afin d'avoir un signal diffracté plus intense. Deux types d'installation sont alors disponibles :

- Des instruments où le rayonnement est monochromatisé dans des gammes d'énergie semblables aux rayons X utilisés en laboratoire : on bénéficie ainsi du haut flux photonique et l'analyse des contraintes se fait classiquement en évaluant la position des pics de diffraction.
- Des instruments où le rayonnement est utilisé sur une gamme d'énergie importante, ce rayonnement est généralement de plus haute énergie que le précédent : la pénétration des rayons X n'est généralement pas négligeable et l'analyse des contraintes s'effectue alors par dispersion d'énergie.

Le volume sonde dépend de la pénétration du rayonnement (rayons X haute énergie ou neutron) mais également à la taille des fentes incidentes et de détection. En diffraction des neutrons, par exemple, les volumes sonde choisis sont relativement importants (plusieurs mm³) afin de compenser les faibles flux disponibles. Cela n'est pas critique si dans ce volume sonde les gradients de microstructure et de contrainte ne sont pas importants. Dans le cas contraire c'est un réel problème, notamment si le volume sonde est positionné au niveau d'une interface. Ces interfaces peuvent correspondre à une surface mais également à la zone de transition entre deux matériaux différents composés d'une ou de plusieurs phases cristallines différentes (dépôts). Dans ces cas là, la position du volume sonde n'est pas confondue avec la position du volume diffractant. Il y a un décalage qu'il faut évaluer afin d'affecter les valeurs des contraintes aux bonnes coordonnées spatiales. La Figure 2 montre

cet effet. Dans la zone I, le volume sonde n'est pas complètement situé dans l'échantillon, l'intensité diffractée augmente en fonction de la taille du volume diffracté. La zone II correspond au maximum de l'intensité diffractée, le volume sonde se trouve complètement dans l'échantillon. Dans la zone III, l'intensité diffractée diminue à cause de l'absorption du rayonnement par le matériau. Ces effets dépendent de la longueur d'onde et du matériau. Des corrections doivent être alors faites pour déterminer les bons gradients de contrainte. Cela est critique aussi bien en diffraction de neutrons qu'en diffraction de rayonnement synchrotron dès lors que l'absorption est importante dans le volume sonde ou qu'il existe une interface dans celui-ci.

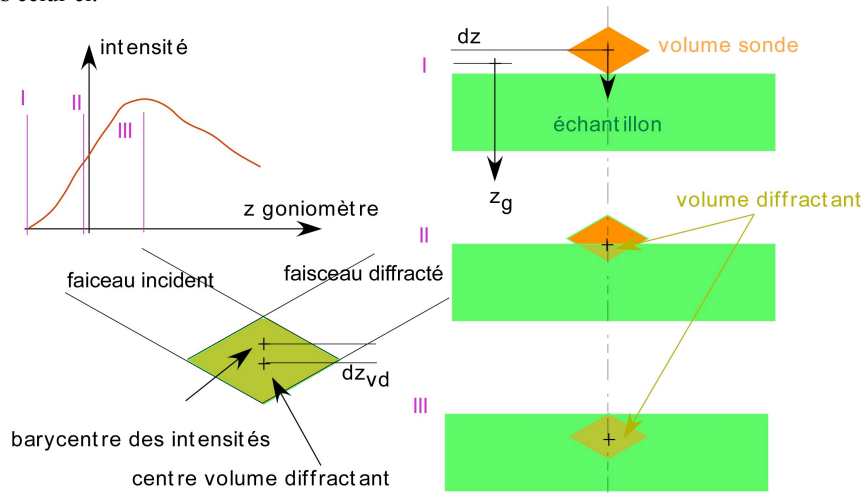


Figure 2 : Effet de la taille du volume diffractant au voisinage de la surface sur la position du barycentre des intensités diffractées (zone I, II, III) et de leur gradient.

À cette problématique s'ajoutent les effets instrumentaux liés à l'inhomogénéité des intensités diffractées et des longueurs d'onde dans le volume sonde. Ces effets sont principalement dus à l'absorption du rayonnement et à la mosaïcité du monochromateur [1]. Ils sont très critiques en proche surface ou au niveau d'une interface et doivent être pris en compte dans l'analyse des contraintes car ils influencent la position du pic de diffraction et celle du volume sonde. Pour les cas plus compliqués (aux interfaces, dépôt, ...), il est possible d'utiliser des approches qui consistent à modéliser l'ensemble spectromètre et pièce étudiée. Il existe plusieurs approches où la modélisation est plus ou moins partielle (chapitre XX). Ces modélisations doivent prendre en compte à la fois les problèmes de diffraction au niveau de la pièce et / ou du monochromateur, le trajet des particules (neutrons ou photons) au travers des systèmes de fentes, la source et le système de détection.

Pluyette et *al.* [1] ont développé une modélisation basée sur une approche originale utilisant une méthode de type Monte-Carlo pour décrire le chemin des particules (originellement développé pour les neutrons, ce modèle peut être appliqué au rayonnement synchrotron) et une description en volumes élémentaires pour décrire la pièce et le monochromateur (lorsqu'il y en a un). Avec ce type d'approche il est possible de déterminer les effets instrumentaux. Par exemple, suivant la configuration du diffractomètre à neutrons (taille des fentes incidentes de détection, distances entre fentes et pièce, monochromateur) la répartition des intensités dans le volume sonde n'est pas uniforme (phénomène de pénombre). Le chapitre XX traite de façon détaillée de l'apport de la simulation numérique pour l'évaluation des contraintes par diffraction de neutrons et de rayonnement synchrotron. Avec ce type de simulation, il est

également possible d'améliorer la résolution spatiale de l'analyse en utilisant plusieurs angles ψ . En effet, la prise en compte simultanée de toutes les données lors du calcul des contraintes permet un gain estimé d'un facteur 4 par rapport à la taille du volume sonde dans la direction de l'analyse.

3- Exemples d'application utilisant les grands instruments

a. Traitement de surface de nitruration

L'avantage principal de l'utilisation des grands instruments dans la détermination des contraintes résiduelles réside dans la grande profondeur de pénétration de ces rayonnements. En effet, les géométries complexes des pièces et la nécessité de déterminer les états de contrainte loin des surfaces justifient l'utilisation de rayonnements pénétrants. On peut citer par exemple la détermination des contraintes résiduelles au niveau de zones à forte courbure comme celle que l'on retrouve en pied de dent d'engrenage. En effet, dans le cas d'engrenage fortement sollicité ces zones sont les plus mécaniquement chargées et sont généralement traitées superficiellement par voie thermochimique (nitruration, cémentation) [1]. Les matériaux de base sont des aciers faiblement alliés de nuance 35CrMo4 pour la cémentation et 32CrMoV13 pour la nitruration. Pour les applications aéronautiques ces nuances sont généralement des alliages refondus ou doublement refondus sous vide afin de réduire les inclusions néfastes à la tenue en fatigue. Ces opérations engendrent des modifications microstructurales bien connues qui durcissent le matériau et qui génèrent aussi des contraintes résiduelles de compression [3]. La profondeur affectée est généralement comprise entre 0,5 et 2 mm suivant la nature du traitement. Elle est du même ordre de grandeur que le rayon de courbure de la surface. Le champ de contrainte généré est alors triaxial et très différent de ce qu'il aurait été pour une surface plane. Le gradient de contrainte est avantageusement déterminé par diffraction des neutrons ou synchrotron car un enlèvement de matière régulier est illusoire et un calcul de redistribution des contraintes très complexe voire impossible. Cependant même si l'utilisation de rayonnements pénétrants facilite la détermination du champ de contrainte il ne subsiste pas moins des difficultés liées à la nature multiphasée du matériau. Compte tenu de la faible fraction volumique des précipités (inférieure à 5%), seules les contraintes locales dans la phase ferritique sont accessibles. Par ailleurs, les contraintes dans la direction normale à la surface ne sont pas nulles (excepté en surface), ceci est dû à la courbure importante de la surface. Les contraintes macroscopiques sont alors triaxiales dans le matériau. Le caractère multiphasé de celui-ci implique également un état de contrainte triaxial dans toutes les phases. Le matériau présente également un gradient de composition rendant difficile la détermination du paramètre de maille du matériau non contraint. Dans ce cas l'approche $\sin^2\psi$ est indispensable, la valeur du d_0 étant déterminée sur un échantillon plan ayant subi le même traitement thermochimique par une analyse triaxiale où l'on suppose que la composante normale des contraintes σ_{33} est nulle. La détermination de l'état complet des contraintes permettra d'optimiser les paramètres de traitement d'une part et de faire des calculs prédictifs en fatigue d'autre part. Ce problème est générique pour toute pièce mécanique où l'étendue du gradient de contrainte est de même amplitude que la courbure locale.

Dans le chapitre XXX, le cas de la détermination des contraintes résiduelles de nitruration sur une éprouvette plane nitrurée est traité, montrant ainsi les possibilités offertes par la diffraction de neutron sur l'analyse de contrainte en proche surface. La Figure 3-a donne un exemple d'analyse de contrainte par diffraction de neutron au niveau d'un congé de raccordement entre deux dents d'un engrenage nitruré [4]. Deux dents d'engrenage ont été modélisées avec plusieurs volumes élémentaires parallélépipédiques afin de décrire au mieux

la géométrie de la pièce. Des profils de contraintes ont été déterminés le long des axes Z_1 et Z_2 . Les contraintes résiduelles ont été analysées suivant les directions d'analyse X_1 et X_2 . La simulation a été faite pour les différents angles ψ choisis, l'orientation du volume sonde par rapport à la dent étant différente comme le montre la Figure 3-b. Sur la Figure 3-c il est possible de voir la dent en situation d'analyse sur le goniomètre E3 du HMI.

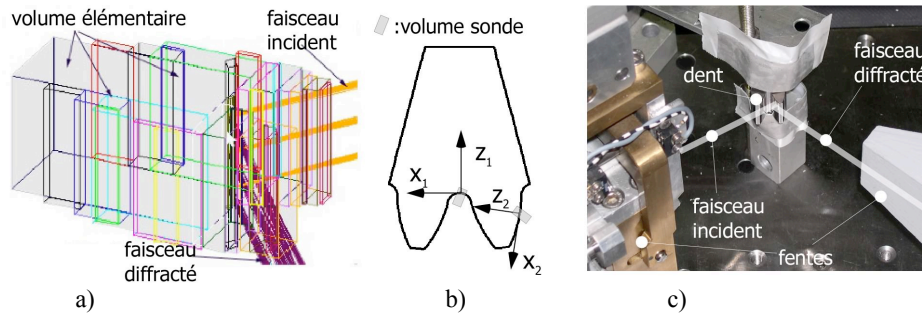


Figure 3 : a) Simulation de l'expérimentation, définition de la pièce par des volumes élémentaires, les trajets des neutrons sont également représentés, b) position du volume sonde, c) situation sur le goniomètre de la dent d'engrenage nitrurée analysée par diffraction des neutrons (instrument E3, HMI) [4].

La Figure 4 donne l'évolution des contraintes résiduelles ($\sigma_{X1}-\sigma_{Z1}$ ou $\sigma_{X1}-\sigma_{Z1}$) au niveau de congé de raccordement entre deux dents d'engrenage et sur le flanc d'une dent. Dans cet exemple le matériau est polyphasé (matrice ferritique + précipité), seules les contraintes résiduelles dans la matrice ferritique ont pu être déterminées, les précipités ne diffractant pas. La triaxialité éventuelle des contraintes ne permet que d'atteindre la différence des contraintes suivant la direction de mesure (X_1 ou X_2) et la normale à la surface (respectivement Z_1 ou Z_2), ceci est lié à la nature polyphasée du matériau. La différence du rayon de courbure local explique l'écart observé en surface. Les courbes ont été tracées à partir d'un lissage polynomial des données expérimentales corrigées par la simulation. L'ordre de grandeur de la correction peut atteindre 50 à 60 MPa. Cet exemple est typique de ce que peut apporter une simulation. Il est, en effet, pas toujours possible de disposer d'échantillons vierges de tout traitement de surface afin de faire une procédure de calibration expérimentale. Cela permet également de gagner du temps, les simulations pouvant être effectuées au préalable et ne nécessite pas de calibration dans la mesure où la méthode des « $\sin^2\psi$ » est utilisée (plusieurs directions d'analyse permettant de s'affranchir de la mesure du paramètre de maille du matériau non contraint). Les courbes en trait pointillé représentent ± 1 fois l'écart type sur la valeur des contraintes (63% de confiance). Ce type d'analyse montre bien que les état de contraintes de nitruration qui sont généralement déterminés sur des surface plane ne sont pas les même si la surface présente un rayon de courbure local. Ceci est, à la fois, du au processus de diffusion de l'azote qui est différent lorsque la surface est plane ou courbe et à la génération des contraintes qui dépend également de la courbure locale (conditions limites pour l'équilibre mécanique). Cette approche n'est pas spécifique à des pièces aéronautiques, mais constitue un réel progrès dans l'analyse des contraintes.

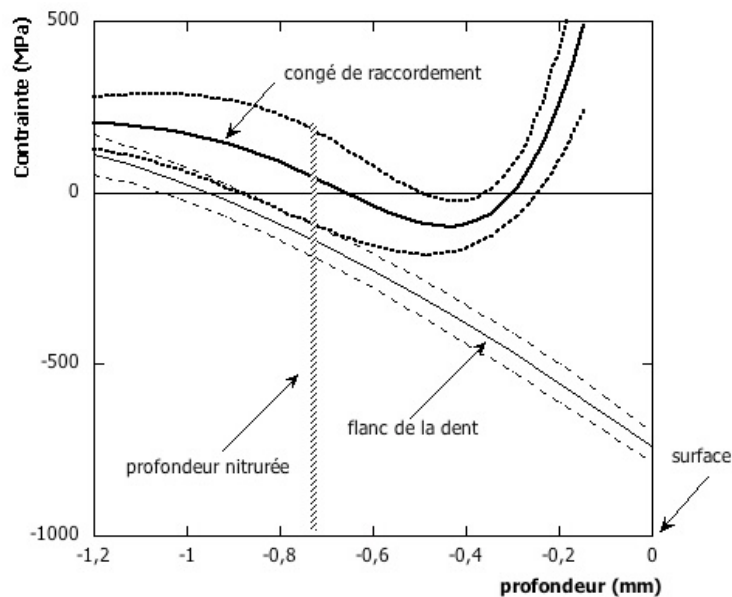


Figure 4 : Évolution des contraintes résiduelles dans une couche nitrurée. Effet de la géométrie locale. Analyse de contrainte par neutrons (HMI) – volume sonde $1 \times 0.7 \times 20 \text{ mm}^3$, pas suivant Z de 0.2 mm, 6 angles ψ [4].

Cette approche utilisant les neutrons a été complétée par la mise en place d'analyse par diffraction de rayonnement synchrotron à l'ESRF [1]. L'utilisation d'un rayonnement polychromatique (ligne ID15A) a permis de réduire de façon très importante le volume sonde par l'utilisation de fentes de $50 \mu\text{m}$ de largeur. La faible valeur de l'angle de diffraction, fixé à 10° , ne permet pas d'avoir des volumes sondes de géométrie simple proche du parallélépipédique, tels que l'on peut les définir en diffraction de neutrons en se plaçant à un angle de diffraction proche de 90° . Celui-ci est en effet allongé dans la direction de diffraction comme le montre la Figure 5. La forme du volume diffractant (partie du volume sonde qui diffracte), quant à elle, dépend au voisinage des surfaces ou des interfaces de l'orientation de la pièce par rapport au faisceau incident. Suivant cette orientation le volume diffractant peut être plus ou moins important. Il convient également de tenir compte de l'absorption du rayonnement. Des corrections doivent, alors, être appliquées, le barycentre du volume diffractant n'étant pas confondu avec le barycentre du volume sonde. Dans le cas de l'analyse synchrotron par dispersion d'énergie les volumes sondes ont des formes très allongées. Cela nécessite, encore plus qu'avec la diffraction des neutrons, des corrections. On retrouve donc le même problème qu'avec la diffraction des neutrons.

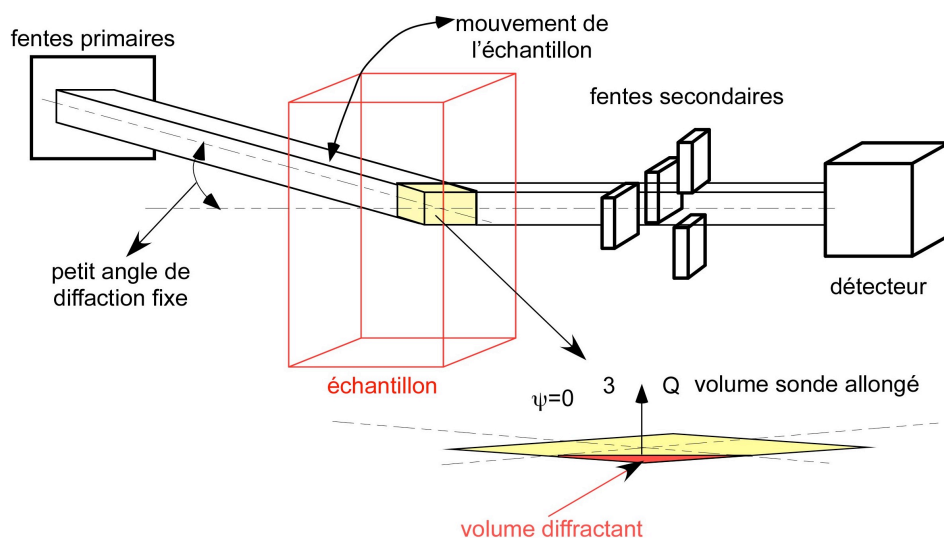


Figure 5 : Géométrie et position du volume sonde dans l'analyse de contrainte par rayonnement polychromatique synchrotron. La forme allongée du volume sonde est du au faible angle de diffraction (généralement inférieur à 10°). Les fentes primaires délimitent un faisceau incident de $50 \times 50 \mu\text{m}^2$, les fentes secondaires de dimensions identiques sont placées devant un détecteur permettant d'enregistrer le spectre en énergie (diode germanium).

L'analyse des contraintes se fait alors en considérant le spectre en énergie par le traitement simultané des différents pics en énergie correspondant aux plans de diffraction de la ferrite comme le montre la Figure 6 (voir chapitre X pour la description de la méthodologie). Dans cet exemple la modélisation du goniomètre a été faite en utilisant la même approche qu'avec la diffraction des neutrons. Le modèle est tout de même simplifié car il n'y a pas de dispersion en intensité dans le volume sonde. Seules les différentes absorptions ont été prises en compte pour les différentes longueurs d'onde (ou énergie) étudiées. Cette approche est complémentaire de l'analyse par diffraction des neutrons. En effet les volumes sondes accessibles par synchrotron sont généralement beaucoup plus petit, le flux photonique de ces instruments étant nettement supérieur aux flux neutroniques actuellement disponibles. Par contre, il convient de prendre absolument plusieurs pics de diffraction pour compenser le manque de discrétisation liée à l'utilisation de détecteur dont le nombre de canaux (généralement 8096 canaux sur étendue de 100 à 150 keV) ne permet pas une discrétisation suffisante d'un seul pic.

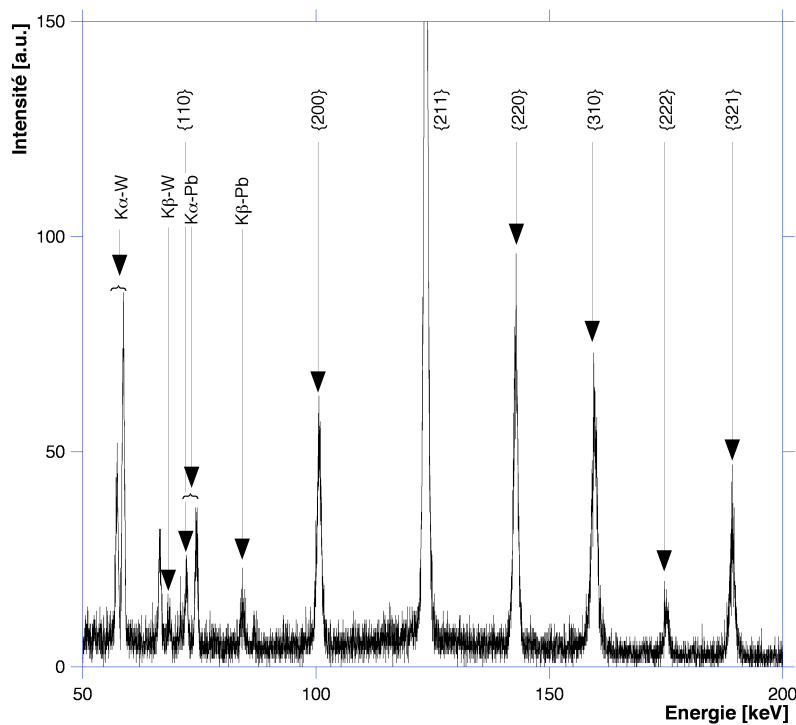


Figure 6 : Spectre en énergie d'un acier nitruré obtenu à l'ESRF ligne ID15A avec un rayonnement polychromatique (angle de diffraction de $10^\circ 2\theta$). Les pics {110}, {200}, {211}, {220}, {310}, {222} et {321} de la phase ferritique ont été traités simultanément [1].

b. Assemblage par FSW

La détermination des états de contrainte peut également se faire dans des matériaux à gradient de microstructure comme les joints soudés. Dans le domaine de l'aéronautique l'utilisation du soudage pour l'assemblage de composants mécaniques (tôles, profilés,...) est relativement récent pour les structures (panneaux de l'Airbus A320 seconde génération par exemple) mais déjà relativement anciens pour des pièces mécaniques (pignons de boîte de transmission d'hélicoptère, composant de moteur d'avion,...). Il n'en reste pas moins que cela reste des opérations relativement complexes à réaliser et surtout à qualifier (durée de vie en fatigue). Le développement de nouvelles techniques de soudage comme le laser et surtout le FSW (« Friction Stir Welding » ou Soudage par Friction Malaxage) demande au concepteur des caractérisations toujours plus poussées des soudures obtenues afin de pouvoir réduire le nombre d'essais de qualification et les coûts de développement (ceci étant associé à la mise en place d'outils de simulation des procédés très performants) [7].

La Figure 7 montre le montage expérimental utilisé pour l'analyse des contraintes par diffraction de neutrons dans un joint soudé FSW d'alliage de magnésium de nuance AZ31 sur le goniomètre du diffractomètre E3 du HMI. Dans ce type d'analyse, il est fondamental de bien définir la position du joint soudé par rapport au goniomètre et au faisceau. Dans cette expérimentation l'épaisseur de la tôle était de 2 mm nécessitant l'utilisation d'un volume sonde de petite dimension (fente incidente et de détection de 0,5 mm de largeur) afin de

pouvoir déterminer le gradient de contrainte à travers l'épaisseur de la tôle (mais aussi dans une direction transverse au joint soudé). Dans cette configuration, la composante transverse des contraintes au joint soudé a pu être déterminée en utilisant la méthode des « $\sin^2\psi$ » en considérant la contrainte normale nulle (angle $\psi = 30^\circ, -60^\circ, 90^\circ$ et 0°). Dans cette approche le gradient de la composante longitudinale des contraintes a été négligé, ceci permettant de prendre une hauteur de fente importante (40 mm pour la fente de détection) afin d'avoir un volume diffractant le plus grand possible pour que le signal de diffraction soit exploitable avec des temps d'acquisition raisonnables (45 minutes par pic pour cette analyse). Pour accéder aux contraintes longitudinales, la hauteur des fentes aurait du être réduite afin de limiter les gradients dans le volume sonde rendant rédhibitoire les temps de mesure. L'avantage de l'utilisation de cette approche est de ne pas être obligé de mesurer le paramètre de maille du matériau non contraint qui varie dans le cordon soudé en fonction de la position d'analyse essentiellement pour des raisons métallurgiques ; le processus de soudage se faisant à des températures suffisamment importantes (supérieures à 400°C [15]) pour générer des variations de composition locales du matériau dans le joint soudé par rapport au matériau de base.

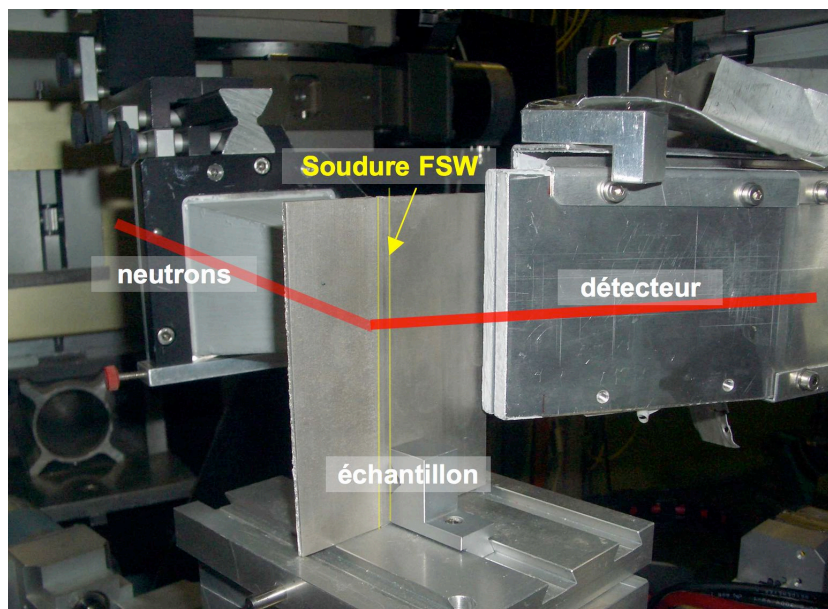


Figure 7 : Montage expérimental pour l'analyse des contraintes par diffraction des neutrons de soudure FSW sur des tôles en alliage de magnésium de nuance AZ31 (HMI).

La Figure 8-a donne l'évolution de la composante dans la direction transverse au cordon de soudure des contraintes résiduelles en fonction de la profondeur d'analyse au niveau de l'interface soudure / métal de base dans la zone affectée thermiquement. Les plans $\{212\}$ du magnésium ont été utilisés, la longueur d'onde était de $0,137\text{ nm}$ pour avoir un angle de diffraction au voisinage de 90° . Les contraintes ont été déterminées en corrigeant les résultats des effets d'absorption du matériau (qui sont relativement faibles pour ce matériau) et surtout des effets de dispersion de longueur d'onde dans le volume sonde (environ 1% de la valeur nominale). Le recalage en profondeur par simulation complète de spectromètre permet également de calculer le décalage systématique en profondeur lié au désalignement du centre

du goniomètre et du barycentre du volume sonde (environ $0,86 \pm 0,54$ mm pour cette expérimentation). Cette valeur tient compte du défaut de parallélisme entre la fente incidente et la fente de détection en plus du défaut de centrage de ces deux fentes par rapport au centre du goniomètre. Cette approche nécessite un lissage des points expérimentaux par des fonctions polynomiales de forme adaptées. En effet, une interpolation des résultats est nécessaire pour recalculer en profondeur le barycentre du volume diffractant qui est affecté par l'angle ψ en particulier. L'erreur sur le niveau des contraintes est donnée pour \pm un écart-type (courbes fines). La Figure 8-b montre bien que le paramètre de maille du matériau non contraint (ici l'angle de diffraction correspondant) n'est pas constant dans l'épaisseur du cordon soudé. Cela correspond à une variation de l'ordre de 9.10^{-3} nm sur la distance interréticulaire des plans $\{212\}$ ($d \approx 0,9743$ nm). Dans cette analyse la texture du matériau base ou de la soudure n'intervient pas au niveau du calcul des contraintes car le monocristal de magnésium est très faiblement anisotrope élastiquement. Par contre il est tout de même nécessaire de connaître la texture du matériau pour choisir de façon optimale les directions d'analyse. Ces analyses de texture ont été parallèlement en laboratoire en diffraction des rayons X. Ces résultats montrent la dissymétrie du joint soudé dans l'épaisseur de la tôle. Ceci peut être lié à un gradient de température lors du soudage entre l'épaule de l'outil et la plaque support. Les mouvements de matière lors du malaxage peuvent être également être très différents suivant le côté de la tôle d'autant plus que celle-ci est de faible épaisseur.

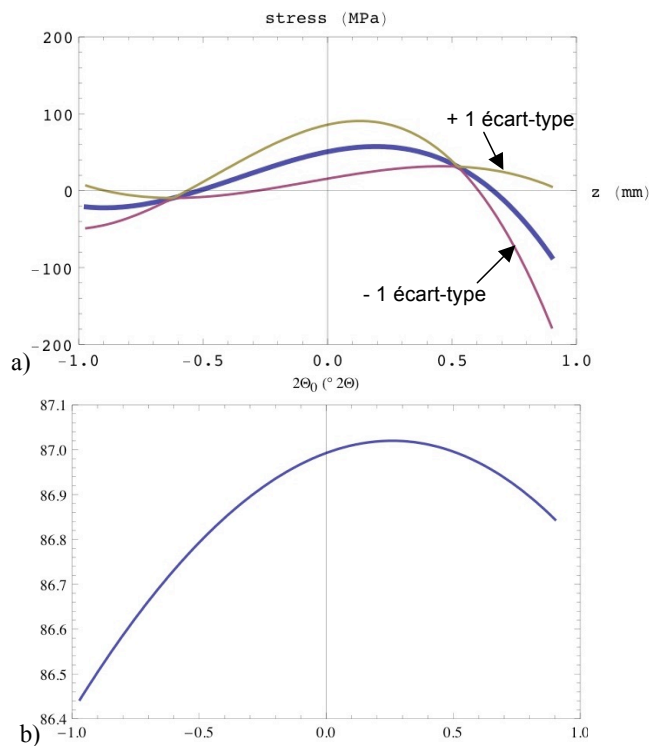


Figure 8 : a) Contrainte dans l'épaisseur au niveau de l'interface joint soudé / métal de base soit approximativement 5 mm du centre de la soudure (soudure FSW d'une tôle de 2 mm d'épaisseur en AZ31) – b) Évolution correspondante de l'angle de diffraction ($2\Theta_0$) du paramètre de maille non contraint (plans $\{212\}$, $\lambda=0,137$ nm) [15].

Dans le domaine de l'aéronautique les assemblages par joint soudés se développent rapidement par la mise au point de nouvelles techniques telle que le FSW ou le laser, techniques automatisables, caractère essentiel à leur utilisation. Dans le domaine du spatial, on peut citer l'assemblage du réservoir du lanceur européen Ariane 5 qui a fait l'objet d'étude importante et où la diffraction des neutrons a permis de corréler la modélisation du soudage des joints soudés avec l'expérimentation [9].

c. Procédé de formage de tôle mince par déformations plastiques locales

Certains procédés de fabrication sont basés sur la génération de contraintes et des déformations induites. On peut citer dans le domaine aéronautique le procédé de mise en forme par déformation plastique de tôles minces appelé « peen forming ». Les déformations plastiques sont généralement générées par l'impact de billes (également utilisées dans le grenaillage de précontrainte) sur une des surfaces de la tôle à former [10]. Il existe d'autres moyens possibles pour déformer plastiquement le matériau comme l'utilisation de percuteurs (pneumatique, électromagnétique ou ultrasonore) ou plus récemment de laser choc [11][12]. La génération d'un gradient de déformations plastiques dans l'épaisseur implique un champ de contraintes résiduelles. La tôle ainsi traitée se déforme et permet d'obtenir des formes variées. Les tailles et les courbures des objets obtenus peuvent être relativement importantes permettant ainsi le formage des tôles avant rivetage sur les nervures des ailes d'avion au niveau du bord d'attaque par exemple. Le contrôle du procédé passe par la maîtrise des champs de déformation et de contrainte générés. Il existe différentes approches de la modélisation du procédé utilisant essentiellement les éléments finis [13]. La confrontation avec l'expérimentation doit se faire au travers des formes obtenues mais également des gradients de contrainte dans l'épaisseur de la tôle. L'apport de la diffraction des neutrons ou de rayonnement synchrotron est alors précieux. On peut citer les récents travaux de Chaieb et *al.* effectués par diffraction des neutrons au LLB sur des tôles mises en forme par choc laser [15]. L'approche numérique utilisant les éléments-finis a pu être confrontée avec une approche expérimentale utilisant les neutrons et le potentiel de cette technique permettant une analyse sans destruction de la pièce ou de l'échantillon étudié. La Figure 10 donne l'évolution des déformations élastiques en fonction de la profondeur pour un échantillon en acier de nuance 42CrMo4 traité par choc laser avec un faisceau d'un diamètre de 2 mm et une puissance surfacique de 8GW/cm^2 [15]. Les mesures ont été réalisées au LLB avec un volume sonde de $20 \times 5 \times 0,3\text{ mm}^3$ et plusieurs longueurs d'onde afin d'avoir la plus grande résolution spatiale suivant un axe perpendiculaire à la surface (Figure 9). L'originalité de la méthode est d'avoir sélectionné plusieurs longueur d'onde afin d'avoir plusieurs angles ψ et cela sans changer la position de la pièce par rapport au goniomètre.

Laurent Barrallier 30/8/y 16:33

Commentaire [1]: Je n'ai pas pu retrouver l'article en question

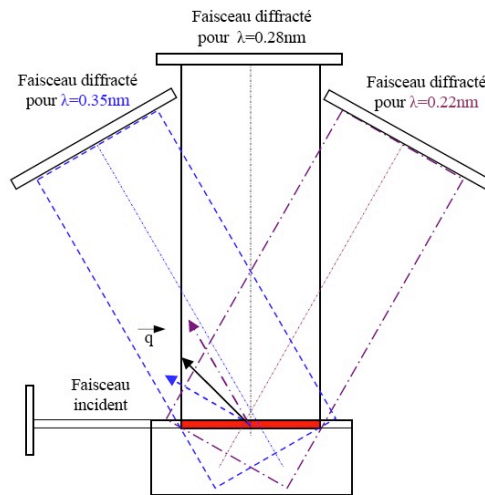


Figure 9 : Positionnement du volume sonde par rapport à l'échantillon. Les angles ψ correspondent aux longueurs d'onde utilisées [15].

Les résultats de la Figure 10 montre l'évolution des déformations correspondantes à la direction $\psi=60,25^\circ$ ($\lambda=0,35$ nm) en fonction de la profondeur. Les résultats bruts ont été corrigés des effets instrumentaux liés à la surface de façon expérimentale en utilisant un échantillon non traité. Ce type d'analyse et le choix de la stratégie utilisés montre qu'il est possible d'utiliser ce type d'instrument de façon originale en jouant sur les possibilités des monochromateurs disponibles.

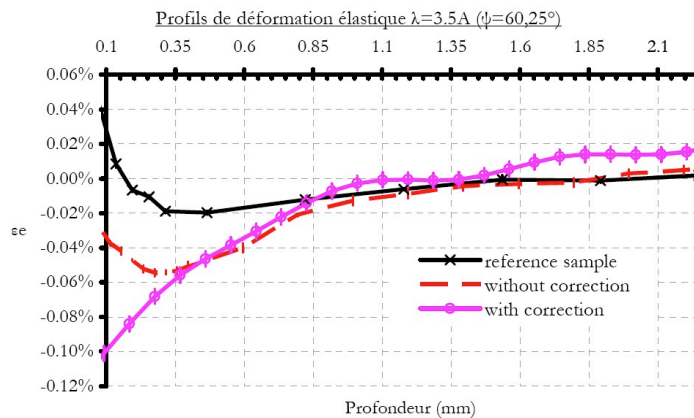


Figure 10 : Profil des déformations élastiques déterminées dans une direction $\psi=60, 25^\circ$. Influence de la correction expérimentale afin de tenir compte de la surface sur les résultats [15].

Dans cet exemple, il est possible de voir l'intérêt de l'analyse par diffraction des neutrons lorsque le champ des contraintes doit être déterminé dans tout l'échantillon. Ici l'épaisseur de l'échantillon est de 5 mm et un profil sur presque la moitié de l'épaisseur a pu être déterminé.

4- Conclusion

La détermination des contraintes résiduelles dans l'aéronautique s'avère indispensable pour l'optimisation des processus de fabrication et pour le calcul en fatigue des pièces. L'analyse expérimentale des contraintes résiduelles permet de valider les modélisations bien souvent réalisées. La diffraction des neutrons et du rayonnement synchrotron permet d'atteindre des zones du matériau loin des surfaces sans enlèvement de matière. C'est l'un des majeurs intérêts de l'utilisation de ces rayonnements. Pour certaines des géométries complexes, l'utilisation de techniques diffractométriques sans enlèvement de matière s'avère également intéressant. Mais ces techniques demandent généralement des corrections afin de prendre en compte les erreurs instrumentales notamment au voisinage des interfaces ou lorsque le matériau absorbe le rayonnement. Ces corrections peuvent être faites expérimentalement ou par modélisation du goniomètre.

5- Références

- [1] Pluyette E. « Évaluation par diffraction de neutrons, des contraintes résiduelles dans des liaisons b-métalliques ». *Thèse d'Arts et Métiers ParisTech* (1997).
- [2] Ghiglione D., Leroux C., Tournier C. « Nitruration, nitrocarburation et dérivés » *Technique de l'ingénieur*, M1227.
- [3] Barralis J., Castex L., Chaize J.C. « Influence des conditions de traitement sur la distribution des phases et des contraintes résiduelles dans les couches nitrurées » *Mémoires et Études Scientifiques Revue de Métallurgie*, 43 :629–642 (1986).
- [4] Fabre A., Barrallier L. « Neutron determination of residual stress in a nitrided notched part » *Material Science Forum*, 490-491:251–256 (2005).
- [5] Sprauel J.-M., Barrallier L., Lodini A., Pyzalla A., Reimers W. Determination of residual stresses in nitrided layers generated by gas nitriding. *ICRS 6*, Oxford, England, 1343-1348 (2000).
- [6] Goret V., Fabre A., Barrallier L., Vardon P. « Evaluation by synchrotron radiation of shape factor effects on residual stress in nitrided layers » *Materials Science Forum*, 224-225:285–290 (2006).
- [7] Mishra R.S., Ma Z.Y. « Friction stir welding and processing » *Materials Science and Engineering R* 50 :1–78 (2005).
- [8] Commin L. « Assemblage des alliages de magnésium laminés à chaud par soudage friction malaxage et soudage laser – Approche expérimentale vers une compréhension
- [9] Bonnafe J.-P., Destandau C., Gabard D. « Welding residual stresses modelling in Aluminium alloys. Experimental validation on samples representative of Ariane 5 main Tank » *ECRS 4*, Cluny en Bourgogne, France, 437-443 (1996).
- [10] Kopp R., Ball H. « Recent Developments In Shot Peen Forming », *ICSP-3*, 297-308 (1987).
- [11] Vollertsen F. « Mechanisms and Models for Laser Forming », *Laser Assisted Net Shape Engineering, Proceedings of the LANE'94*, B.Meisenbach Ed., 1 :345-360 (1994).
- [12] Li W., Yao Y.L. « Numerical and Experimental Investigation of Convex Laser Forming Process », *SME J. of Manufacturing Processes*, 3:73-81 (2001).
- [13] Wang T., Platts M.J., Levers A., « A process model for shot peen forming » *Journal of Materials Processing Technology*, 172,2:159-162 (2006).

- [14] Chaieb L, Braham C., Peyre P., Labbe F., Lodini A., « Neutron diffraction analysis of residual stresses induced by laser shock peening » *Materials Science Forum*, 490-491:263-268 (2005).
- [15] Chaieb L. «Analyse et simulation des contraintes résiduelles induites par des traitements mécaniques de précontrainte en grenaillage et choc laser ». *Thèse de l'Université de Reims Champagne-Ardenne*, (2004).des propriétés mécaniques ». *Thèse d'Arts et Métiers ParisTech*, (2008).